

МЕТОДИКА ОПИСАНИЯ ПРОФИЛЕЙ ЛИНИЙ МОЛЕКУЛЫ СО С ПОМОЩЬЮ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ

Д. А. Ладейщиков

Астрономическая обсерватория Уральского федерального университета

В настоящей работе исследованы особенности анализа профилей линий молекулы СО в гигантских молекулярных облаках (ГМО). С помощью различных инструментов анализа разработана методика, позволяющая в рамках локального термодинамического равновесия использовать несколько линий излучения молекулы СО для построения и оптимизации модели и определения физических параметров ГМО. Методика включает выделение сгустков с помощью алгоритма GAUSSCLUMP, а также автоматизированное построение многослойной модели переноса излучения для сгустков с использованием методов оптимизации и Монте-Карло. Методика применена на практике для анализа крупномасштабного картографирования комплекса звездообразования S231-S235 в четырех различных линиях СО.

A TECHNIQUE FOR DESCRIBING LINE PROFILES OF THE CO MOLECULE USING A MULTI-COMPONENT RADIATION TRANSFER MODEL

D. A. Ladeyschikov

Astronomical Observatory of the Ural Federal University

In this work, we investigated the features of the analysis of complex CO line profiles in giant molecular clouds (GMCs). A technique has been developed to use several emission lines of the CO molecule to build a model and determine GMCs physical parameters within the local thermodynamic equilibrium framework. The technique includes clumps extraction using the GAUSSCLUMP algorithm and constructing a multilayer radiation transfer model for clumps using optimization and Monte Carlo methods. The technique was applied to analyze large-scale mapping of the S231-S235 star formation complex in four different CO lines.

Молекула СО является основным инструментом для исследования молекулярного газа в межзвездной среде. Зачастую наблюдаются сразу несколько линий молекулы СО, в частности, изотопические разновидности ^{13}CO и C^{18}O , а также различные вращательные переходы молекулы СО, в том числе (1-0), (2-1), (3-2) и др. Возникает вопрос: каким образом использовать данные для построения модели, которая согласуется со всеми имеющимися наблюдениями молекулы СО?

Вариантом решения поставленной задачи является использование многослойной модели переноса излучения в предположении локального термодинамического равновесия (ЛТР). Решение уравнения переноса в этом случае имеет следующий вид:

$$T_{R,v} = T_{R,v}^{\text{prev}} \exp(\tau_v) + T_0 \left(\frac{1}{\exp(T_0/T_{ex}) - 1} - \frac{1}{\exp(T_0/T_{bg}) - 1} \right) [1 - \exp(\tau_v)], \quad (1)$$

где $T_{R,v}^{\text{prev}}$ — яркостная температура на выходе из предыдущего слоя на лучевой скорости v (для первого слоя $T_{R,v}^{\text{prev}} = 0$); $T_0 = h\nu/k$; T_{ex} — температура возбуждения линии (едина для всех линий СО в случае ЛТР); T_{bg} — температура фонового излучения (~ 2.7 K); τ_v — профиль-фактор оптической толщины, который выражается как $\tau_v = \tau_0 \exp([v - v_0]^2/\sigma^2)$,

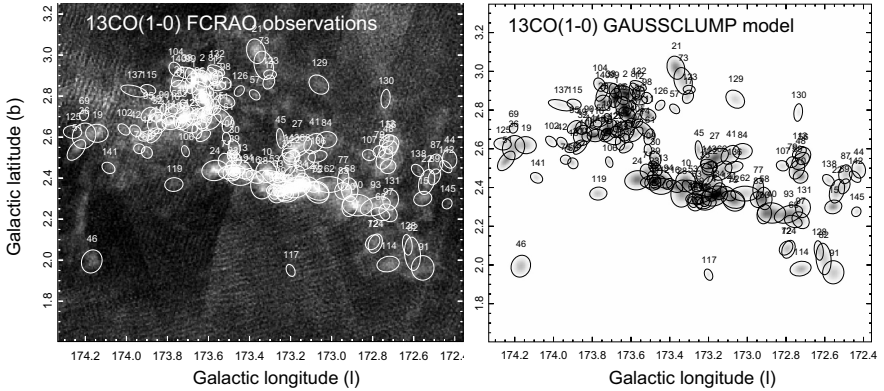


Рис. 1. Результат выделения сгустков методом GAUSSCLUMP в области звездообразования S231-235. Панель слева — нулевой момент карты излучения линии $^{13}\text{CO}(1-0)$ с телескопа FCRAO; панель справа — имитация исходной карты, построенная по данным из каталога GAUSSCLUMP

где τ_0 — оптическая толщина в центре линии; v_0 — лучевая скорость центра линии; σ — доплеровская ширина линии ($\sigma = \text{FWHM}/2.3548$).

Таким образом, модель имеет четыре свободных параметра: лучевая скорость центра линии (v_0), оптическая толщина в центре линии (τ_0), температура возбуждения (T_{ex}) и ширина линии (σ). Эти параметры в рамках ЛТР одинаковы для всех линий CO, кроме оптической толщины, которая меняется в соответствии с соотношением обилий изотопов. Малое число свободных параметров — одно из преимуществ данной модели по сравнению с не-ЛТР моделью, где число параметров больше и они различаются для разных переходов молекулы CO. Параметры модели в рамках ЛТР позволят перейти к лучевой концентрации и массе газа по методике, подробно описанной в приложении 1 к работе Ладейщикова [1].

Наблюдаемая яркостная температура в модели рассчитывается по формуле 1 на выходе из каждого слоя и затем итерационно используется в качестве фона для последующего слоя. Таким образом, наблюдаемый профиль спектральной линии может быть описан с помощью отдельных компонент (соответствуют слоям в модели) даже в случае частичного их блендирования. Основная задача — найти такие параметры для каждого слоя, чтобы суммарный профиль линии по всем слоям согласовался с наблюдаемым профилем сразу по нескольким линиям CO.

Для отработки методики анализа были использованы данные крупномасштабного картографирования линий CO в области звездообразования S231-235. Набор данных включает четыре линии: $^{12}\text{CO}(1-0)$, $^{13}\text{CO}(1-0)$ с телескопа FCRAO [2] и $^{12}\text{CO}(2-1)$, $^{13}\text{CO}(2-1)$ с телескопа SMT [3].

В первую очередь с помощью алгоритма GAUSSCLUMP [4] были выделены все значимые сгустки, в которых присутствует излучение линии $^{13}\text{CO}(1-0)$. Данная линия была выбрана по той причине, что она является наиболее оптически тонкой из всего набора. В результате применения алгоритма было найдено 145 сгустков. Из анализа выделенных сгустков установлено, что значительная часть сгустков в проекции на картинную плоскость пересекается, а разделены они могут быть только по лучевой скорости (рис. 1). Важным преимуществом метода GAUSSCLUMP является возможность выделения сгустков, которые имеют пересечение, а также корректное описание градиента скорости для каждого сгустка.

Для каждого сгустка получено начальное приближение для расчета модели перено-

са излучения. Лучевая скорость для каждого густка установлена из каталога густков GAUSSCLUMP. Температура возбуждения рассчитана из антенной температуры линии $^{12}\text{CO}(1-0)$ в предположении, что данная линия является оптически толстой. Оптическая толщина рассчитана из уравнения переноса излучения при заданном значении температуры возбуждения и яркостной температуры линии $^{13}\text{CO}(1-0)$. Дисперсия скорости получена из ширины наблюдаемой линии $^{13}\text{CO}(2-1)$. Данное начальное приближение соответствует классическому подходу определения физических параметров по двум изотопам ^{12}CO и ^{13}CO , который часто используется в литературе.

Важно отметить, что в наблюдаемых спектрах молекулы CO отражается суммарное излучение от нескольких густков, которые попали в диаграмму направленности телескопа в выбранном направлении. Следовательно, при поиске оптимальных параметров модели следует учитывать не только модель единственного густка, в направлении на который извлечен спектр, а многослойную модель для всех густков, которые попали в диаграмму направленности телескопа в выбранном направлении. С помощью начального приближения для каждого густка M_i строится модельный профиль различных линий CO. Число слоев для модели N устанавливается в зависимости от числа густков GAUSSCLUMP, которые пересекают диаграмму направленности в направлении на центр густка M_i . Затем с помощью метода максимального правдоподобия ищутся уточненные значения параметров для густка M_i . При этом параметры модели для густка M_i варьируются, а параметры остальных густков фиксируются начальным приближением. Далее с помощью метода Монте-Карло (использована реализация емеев [5] на языке Python) происходят дальнейшее уточнение значений параметров густка M_i и оценка доверительного интервала.

Для перехода от одномерных спектров к модели распределения излучения в пространстве «положение—положение—лучевая скорость» предполагается, что для каждого густка значения температуры возбуждения и ширины линии не меняются в зависимости от положения. Меняются только оптическая толщина и лучевая скорость густка в зависимости от параметров источников из каталога GAUSSCLUMP. В центре каждого густка оптическая толщина и лучевая скорость соответствуют параметрам «одномерной» модели. При удалении от центра оптическая толщина уменьшается пропорционально размеру и позиционному углу рассматриваемого источника GAUSSCLUMP. Лучевая скорость меняется в соответствии с градиентом скорости, найденным при помощи GAUSSCLUMP. Таким образом, параметры «одномерной» модели каждого густка с привлечением данных из каталога GAUSSCLUMP позволяют построить «трехмерную» модель густка в любой разновидности линии CO.

Описанный подход позволяет получить параметры модели для каждого густка в отдельности даже в том случае, когда наблюдаемый профиль линии CO является суммой из нескольких компонент, которые в том числе могут блендироваться. Данная ситуация типична для линий молекулы CO, которые зачастую имеют сложный профиль. Многослойный подход позволяет также описать профили самопоглощения, когда в линии ^{13}CO имеется единственный пик, а в линии ^{12}CO — двойной пик. Это делается путем введения внешнего к наблюдателю слоя с относительно невысокой оптической толщиной и температурой возбуждения по отношению к основному слою. На рис. 2 представлены два характерных случая профилей молекулы CO и их модели: несколько отдельных компонент (густок № 18) и профиль самопоглощения (густок № 3). Таким образом, описанная процедура позволяет использовать сразу несколько линий молекулы CO для построения модели молекулярных облаков в предположении ЛТР. Более подробное описание методики, исходные коды и инструменты для анализа доступны по ссылкам https://github.com/DmityL/CO_model, <https://co-model.readthedocs.io>.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-02-00917.

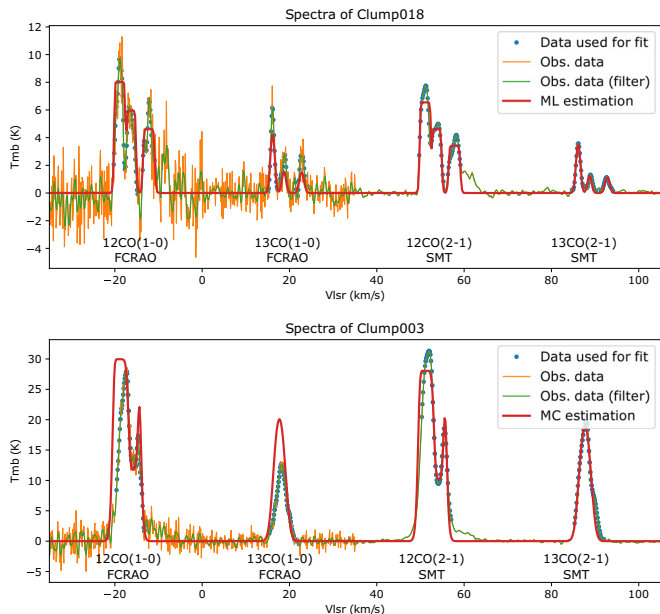


Рис. 2. Два характерных вида профилей линии CO в молекулярных облаках: № 18 — несколько изолированных компонент, № 3 — профиль самопоглощения. Оранжевым цветом показаны наблюдаемые спектры различных линий CO; зеленым — исходные спектры, сглаженные с помощью низкочастотного фильтра; точками отмечены значения, использованные для построения модели; красным цветом показана визуализация профилей спектральных линий CO в наилучшей найденной модели (ML — метод наибольшего правдоподобия, MC — метод Монте-Карло)

Библиографические ссылки

- [1] Ladeyschikov D. A., Kirsanova M. S., Tsvilev A. P., Sobolev A. M. Molecular emission in dense massive clumps from the star-forming regions S231-S235 // *Astrophysical Bulletin*. — 2016. — Vol. 71, № 2. — P. 208–224. 1605.08917.
- [2] Heyer Mark H., Brunt Christopher, Snell Ronald L. et al. The Five College Radio Astronomy Observatory CO Survey of the Outer Galaxy // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 1998. — Vol. 115, № 2. — P. 241–258.
- [3] Bieging John H., Patel Saahil, Peters William L. et al. The Arizona Radio Observatory CO Mapping Survey of Galactic Molecular Clouds. V. The Sh2-235 Cloud in CO J=2-1, ^{13}CO J=2-1, and CO J=3-2 // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2016. — Vol. 226, № 1. — P. 13.
- [4] Stutzki J. GAUSSCLUMPS: Gaussian-shaped clumping from a spectral map. — 2014. 1406.018.
- [5] Foreman-Mackey Daniel, Hogg David W., Lang Dustin, Goodman Jonathan. emcee: The MCMC Hammer // *Public. Astron. Soc. Pacific*. — 2013. — Vol. 125, № 925. — P. 306. 1202.3665.